

утилізації кондиційного метану із застосуванням контейнерних теплоелектростанцій (КТЕС).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Безпфлюг Г.Л. Об эффективности ТЭС на шахтном газе / Г.Л. Безпфлюг, В.В. Касьянов // Уголь Украины. – 2007. – №8. – С. 46-47.
2. Безпфлюг Г.Л. Экономическая оценка различных технологий утилизации метана / Г.Л. Безпфлюг, В.В. Касьянов // Уголь Украины. – 2008. – №1. – С. 47-48.
3. Булат А.Ф. О проблеме энергетической переработки метана угольных месторождений / А.Ф. Булат, И.Ф. Черемис // Уголь Украины. – 2002. – №6. – С. 6-9.
4. Кауфман Л.Л. Добыча горючих газов угольных месторождений. Обзор зарубежного опыта / Л.Л. Кауфман, Н.И. Кулдыркаев, Б.А. Лысиков. – Донецк: Вебер, 2007. – 292 с.
5. Метан угольных шахт Украины: производственный и инвестиционный потенциал шахт Донбасса / Д.Р. Триплет, А.Э. Филиппов, А.А. Писаренко. – К.: Логос, 2000. – 132 с.
6. Сургай М.С. Вугільна промисловість та навіколишнє середовище / М.С. Сургай, В.А. Куліш, Ю.С. Кузін // Уголь Украины. – 2008. – №11. – С.28-31.

УДК 624.131

Кравець В.Г., д.т.н., проф., зав. каф. ГБГТ, Зуєвська Н.В., к.т.н., доц., Волик Ю.В., асп., каф. ГБГТ, НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АРМУВАННЯ ПРОСАДНОГО ҐРУНТУ ЩЕБЕНЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИБУХУ ЦИЛІНДРИЧНОГО ЗАРЯДУ

Задачі з дослідження особливостей взаємодії проникаючого тіла і природного середовища часто виникають на практиці. Теорія удару з великими швидкостями вперше була розроблена К.П. Станюковичем, Х.А. Рахматуллінім, Зельдовичем і Райзером [1 - 3]. Цій темі присвячені численні дослідження [4,5], де приймаються різні гіпотези про взаємодіючі об'єкти.

В роботі розглядається математична модель проникнення щебеню в ґрунтовий масив при динамічному впливі на нього вибуху циліндричного заряду ВР (рис.1), що дозволяє описувати напружено-деформований стан ґрунту і частинок щебеню при різних фізико-механічних і геометричних параметрах аналізованих об'єктів.

При цьому процес розбивається на два етапи. На першому етапі розглядається рух частинок щебеню і продуктів вибуху при миттєвій хвильовій детонації. На другому досліджується процес руху щебеню та ґрунту.

Постановка задачі про метання щебеню в ґрунт за допомогою вибуху циліндричного заряду ВР здійснювалася наступним чином. Щоб виключити вплив кінців заряду і нерадіальність розльоту продуктів детонації, заряд вважався нескінченним, а детонація - миттєвою. Після вибуху заряду ВР продукти детонації (ПД) розширюються і захоплюють за собою частки щебеню, прискорюючи і прогріваючи їх до високої температури. Після того як продукти вибуху досягають кордону з ґрунтом, виникає відображена ударна хвиля, яка призводить до гальмування частинок. Ступінь гальмування визначається параметрами відбитої хвилі і частинок щебеню. Очевидно, що більш дрібні частинки повинні відчувати більш сильне гальмування.

Розліт продуктів детонації повинен описуватися стандартними рівняннями динаміки суцільного середовища, що стискається.

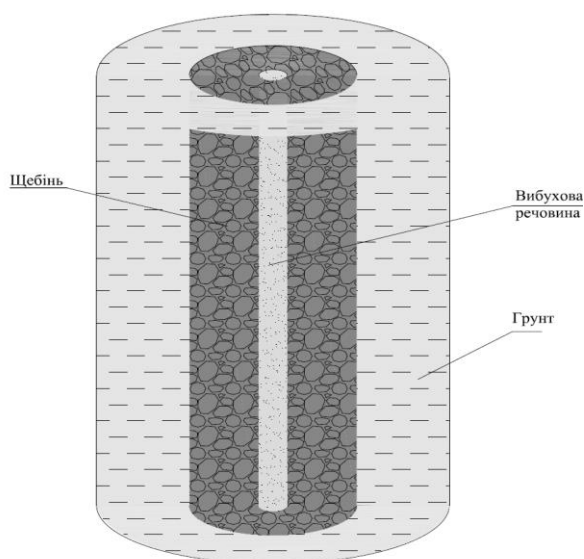


Рис. 1. Циліндричний заряд хімічної вибухової речовини (ВР), поміщену в порожнину, заповнену щебенем, розташовану в ґрунтовому масиві

Ці рівняння у формі законів збереження маси, імпульсу і енергії для випадку циліндричної симетрії мають вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho x) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u x) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u x) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 x + p x) = p, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho x \left(E + \frac{u^2}{2} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u x \left(E + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) \right) = 0, \quad (3)$$

де ρ , u , E , P - щільність, швидкість, внутрішня енергія і тиск газу; x - просторова координата; t - час.

Рівнянням стану ПД є рівняння стану ідеального газу

$$p = \rho R T \quad (4)$$

де R - універсальна газова стала; T - температура газу.

Система рівнянь (1) - (4) є замкнутою системою для визначення термодинамічних величин ПД. Для чисельного розв'язання поставленої задачі використовувалася неявна різницева схема "предиктор-коректор", стійка при будь-якому відношенні $\Delta t / \Delta h$ [6,7].

Використовувана різницева схема вимагає запису рівнянь руху суцільного середовища в характеристичній формі, яка для випадку циліндричної симетрії має вигляд:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial t} \right) + (u + c) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = -\frac{uc}{x} \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial t} \right) + (u - c) \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{\rho c} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{uc}{x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

де c - швидкість звуку; S - ентропія.

Вважається, що всі частки щебеню під дією продуктів вибуху, що розширюються, рухаються компактною зоною, тобто що параметри і координати всіх частинок близькі між собою, і їх можна описати параметрами однієї "міченої" частинки з даного шару.

Рівняння руху міченої частинки має вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{2} \pi r^2 \rho_2 C_s |u - v| (u - v) \quad (8)$$

де m - маса частинки; x - просторова координата частинки; t - час; r - радіус частинки; C_s - коефіцієнт опору; ρ_2 - щільність щебеню; u - швидкість ПД; v - швидкість частки щебеню.

Враховуючи, що для маси і швидкості частки маємо вираз

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2, \quad \frac{dx}{dt} = v \quad (9)$$

Отримаємо рівняння, що визначає швидкість частки від часу:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{3 \rho_2 C_s |u - v|}{8 r \rho_2} \quad (10)$$

де C_s - коефіцієнт опору, що залежить від числа Рейнольдса частинки.

В розрахунках приймалося, що діаметр заряду ВР становив $d_0 = 0,04$ м, діаметр свердловини складав $d_{св} = 0,250$ м. Як ВР використовувався амоніт № 6ЖВ. Детонаційні характеристики амоніту № 6ЖВ наступні: $P_n = 3,248 \cdot 10^9$ Па; $\rho_n = 1000$ кг/м³; $D_0 = 4340$ м/с; $Q = 1030$ ккал/кг; $\gamma = 1,25$.

Фізико-механічні характеристики щебеню: $\rho = 1900$ кг/м³ - насипна щільність матеріалу частинок. Діаметр частинок щебеню приймався рівним 20 і 40 мм. Відзначимо, що при діаметрі частинки щебеню рівному 20 мм, по радіусу порожнини міститься 5 - 6 частинок, а при діаметрі рівному 40 мм - 3 частинки, відповідно.

На рис. 2 наведені графіки швидкості в системі «ПД - щебінь» в різні моменти часу при вибуху циліндричного заряду амоніту № 6ЖВ. По осі ординат відкладені значення функції в системі СІ, а по осі абсцис - відстань від осі заряду до кордону свердловини з ґрунтом.

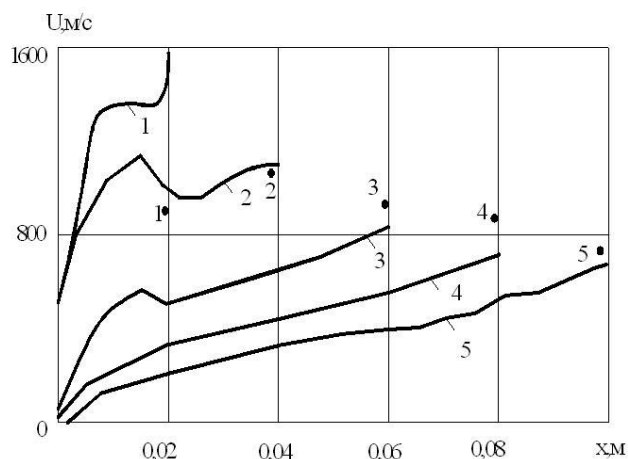


Рис.2. Розподіл швидкості під час вибуху циліндричного заряду амоніту №6ЖВ в різні моменти часу: 1 - вихід ударної хвилі на межу «продукти детонації - щебінь»; 2, 3, 4, 5 - вихід хвилі на відповідну частку щебеню (діаметр частинки дорівнює 20 мм)

З рис. 2 видно, що частки щебеню, що безпосередньо примикають до ПД, набувають швидкість близько 1000 м/с. Далі ця швидкість зростає незначно, але починає перевищувати

швидкість ПД. З аналізу залежностей також випливає, що при досягненні хвилею кордону зі щебенем відбувається стрибок швидкості, обумовлений виходом хвилі з менш щільного середовища в більш щільне середовище (ефект відбиття від твердої стінки). При цьому виникає відображена ударна хвиля, яка гальмує потік газу, що набігає. Фронт відбитої ударної хвилі рухається від контактного розриву «ПД - щебін» до осі заряду зі змінною швидкістю, що є наслідком зміни набігаючого потоку газу. Область відбитої ударної хвилі істотно впливає на швидкість частинок щебеню, приводячи до їх різкого гальмування. Після проходження частиною щебеню зони відбитої ударної хвилі її швидкість зменшилася більш, ніж на 250 м/с.

На рис. 3 представлені профілі тиску за фронтом розширюються продуктів вибуху для розглянутого вище випадку.

При порівнянні результатів чисельного розрахунку для тих же параметрів заряду та типу ВВ, але радіус частинок щебеню збільшено в 2 рази було встановлено, що хвильові процеси протікають за подібною схемою, але при збільшенні діаметру частинок щебеню відбувається зниження швидкості на 400 м/с. Це пояснюється тим, що такі великі частки не встигають набрати достатньої швидкості в початковий момент руху, коли швидкість розльоту продуктів детонації найбільша. Очевидно, що зі збільшенням діаметра частинок щебеню буде відбуватися подальше зменшення визначальних параметрів руху.

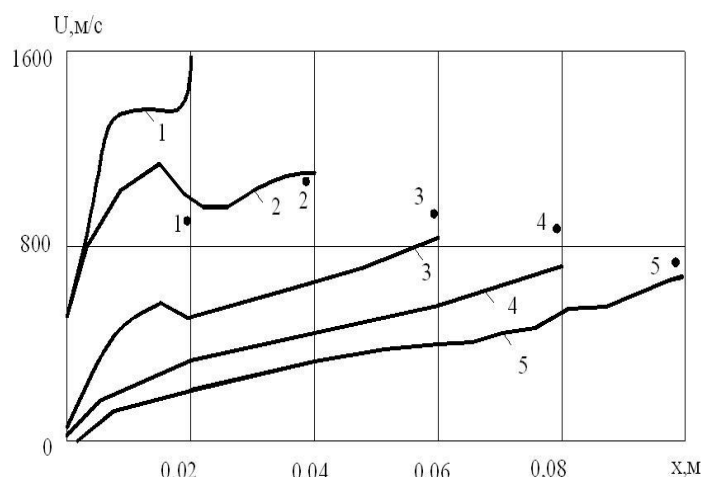


Рис. 3. Розподіл тиску при вибуху циліндричного заряду амоніту №6ЖВ в різні моменти часу: 1 - вихід ударної хвилі на кордон «продукти детонації - щебін»; 2, 3, 4, 5 - вихід хвилі на відповідну частку щебеню (діаметр частинки 20 мм)

Далі проводилися чисельні розрахунки з метою з'ясування впливу детонаційних характеристик ВР на процес руху системи «продукти детонації - щебін». Для цього було проведено порівняння вибуху циліндричного заряду амоніту № 6ЖВ та для вибуху циліндричного заряду грамоніту 79/21. Інші параметри залишилися колишніми. Було встановлено, що основні закономірності розвитку хвильових процесів у системі «продукти детонації - щебін» зберігаються, проте під час вибуху заряду грамоніту 79/21 відбувається зменшення швидкості їх підльоту до стінки порожнини на 350 м/с і тиску на $5 \cdot 10^7$ Па.

Результати чисельного розрахунку хвильових процесів у лесовидному суглинку при проникненні щебеню з різним вмістом компонентів. Фізико - механічні характеристики ґрунту наступні [8]: $\rho_{20} = 1000$ кг/м³; $\rho_{30} = 2650$ кг/м³; $c_{20} = 1500$ м/с, $c_{30} = 4500$ м/с; $\gamma_2 = 7$; $\gamma_3 = 4$; $\rho_0 c_s^2 = 3 \cdot 10^7$ Па; $\rho_0 c_D^2 = 3,67 \cdot 10^7$ Па; $\rho_0 c_{SR}^2 = 3 \cdot 10^7$ Па; $m = 3$; $k = -1,2 \cdot 10^7$ Па; $\gamma_S = 4$; $\gamma_D = 6$; $\gamma_{SR} = 8$; $\eta_D = 2000$ Па·с; $\alpha_1 = 0,1 \dots 0,4$; $\alpha_2 = 1 - (\alpha_1 + \alpha_2)$; $\alpha_3 = 0,6$; $y_0 = 0,9 \cdot 10^6$ Па, $\tau = 5 \cdot 10^6$ Па, $\tau = 12 \cdot 10^6$ Па.

При проникненні частинок щебеню в ґрунт за останнім починає поширюватися ударна хвиля. На рис. 4 показані залежності радіальних напружень ґрунту від відстані.

З малюнка видно, що в початковий момент часу при ударі щебеню о ґрунт відбувається генерація ударної хвилі. Для одних і тих же діаметрів частинок щебеню великі значення радіальних напружень досягаються в ґрунті з меншим вмістом порового простору, тобто з більшою щільністю. Це пояснюється тим, що в такому середовищі дисипативні втрати при поширенні хвилі, пов'язані з в'язкими властивостями, менше, ніж у більш пористому середовищі.

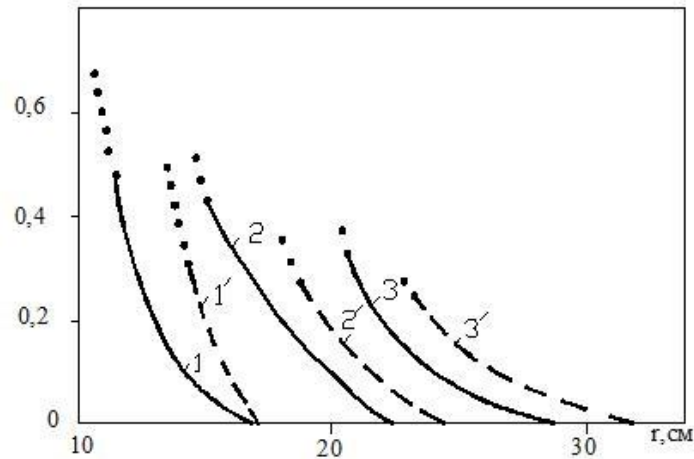


Рис. 4. Залежність радіальних напружень ґрунту від відстані при вибуху заряду амоніту № 6ЖВ при різних діаметрах частинок щебеню: 1, 1' - $R=20$ мм, 2, 2' - $R=40$ мм, 3, 3' - $R=70$ мм. Суцільні лінії відповідають ґрунту з $\alpha_1=0,1$; штрихові - $\alpha_1=0,3$; чорні точки - частинкам щебеню

На поверхні частинок максимальні нормальні напруги більше, ніж у ґрунті, і чим пізніше частка потрапляє в ґрунт, тим більше у неї напругу. Це пояснюється тим, що при впливі продуктів детонації на щебінь, частинки, які знаходяться ближче до газової порожнини, отримують значний початковий тиск. При збільшенні діаметра частинок відбувається падіння напруги як в ґрунті, так і на самі частки, що є закономірним, тому що більші частки при впливі на них тиску з боку продуктів детонації спочатку отримали менший тиск. Однак великі частинки, маючи велику інерцію, проникають в ґрунт на великі відстані: для частинок діаметром 20 мм - це відстань становить 12 - 15 см, для 40 мм - 16 - 40 см, для 70 мм - 23 - 25 см. Але у відносних відстанях частки діаметром 20 мм проникнуть в ґрунт на глибину, рівну $6 - 7,5 R$, частинки діаметром 40 мм на $4 - 5 R$, частинки діаметром 70 мм - на $3 - 4,5 R$.

Зазначену закономірність можна простежити і на рис. 5. де в логарифмічних координатах наведені залежності максимальної швидкості частинок щебеню в ґрунті з $\alpha_1=0,1$

З аналізу малюнка слідує, що маючи велику початкову швидкість, частинки меншого діаметра швидше гальмуються, що призводить до зниження їх швидкості і, як наслідок, до зменшення їхньої глибини проникнення в ґрунт.

Виконані авторами цієї статті дослідження дозволяють сформулювати такі основні висновки:

1. В результаті математичного моделювання проникнення щебеню в ґрунтовий масив при динамічному впливі на нього вибуху циліндричного заряду ВР встановлено, що частинки щебеню меншого діаметру при впливі на них продуктів детонації розлітаються з більшою швидкістю і при більшому тиску в порівнянні з більш великими частками. Під час вибуху заряду амоніту № 6ЖВ ці параметри вище, ніж при вибуху грамоніту 79/21, який володіє

меншими детонаційними характеристиками.

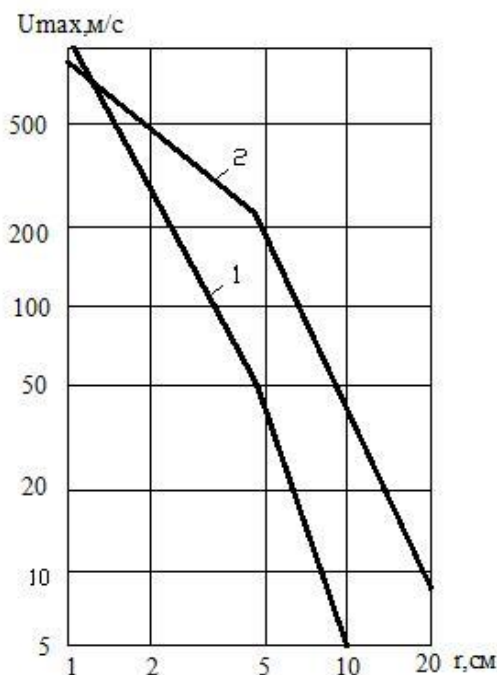


Рис. 5. Залежності максимальної швидкості частинок щебеню в ґрунті при проникненні частинок різного діаметра: 1 - $R = 20$ мм, 2 - $R = 40$ мм

2. Для одних і тих же діаметрів частинок щебеню великі значення радіальних напружень досягаються в ґрунті з меншим вмістом порового простору, тобто з більшою щільністю.

3. При збільшенні діаметра частинок відбувається падіння напруги як в ґрунті, так і на самі частки, але великі частки проникають в ґрунт на великі відстані. Глибина проникнення для розглянутих діаметрів складає від 3 до 7,5 діаметрів.

4. При проникненні щебеню в ґрунт відбувається його ущільнення, причому на однакових відстанях великі значення об'ємної деформації досягаються в ґрунті з більшою вільною пористістю.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Зельдович Я.Б. Движение газа под действием кратковременного давления (удара) /Я.Б.Зельдович//Акустический журнал.-1956.- № 1.- Вып. 28. – С. 31 -38.
2. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды/ К.П. Станюкович.- М.: Наука, 1971. – 854 с.
3. Рахматуллин Х.А. Распространение возмущений в нелинейной упругой среде/ Х.А. Рахматуллин, Г.С. Шапиро// Изв.АН СССР,ОТН.-1955.- №2(68). – С. 23 – 31.
4. Александров Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем. / Е.В. Александров ,В.Б. Соколинский.- М.: Наука, 1969. – 200с.
5. Сагомоян А.Я. Проникание/А.Я.Сагомоян.- М.: Из-во Моск. ун-та, 1974.
6. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики/ Г.И. Марчук .-М.: Наука, 1989. - 543с.
7. Самарский А.А. Численные методы/ А.А. Самарский, А.В. Гулин . М.: Наука, 1989. – 256 с.
8. Лучко И.А. Механический эффект взрыва в грунтах / И.А.Лучко, В.А. Плаксий, Н.С. Ремез. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.